

УДК 004.052

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163871

## Розробка методики комплексного використання методів сценарного прогнозування

І. І. Коваленко, Є. О. Давиденко, А. В. Швед

*Запропоновано методику комплексного застосування методів сценарного аналізу та прогнозування, представлених графами типу «дерево». Розглянуто задачу аналізу ризиків програмних проєктів, пов'язаних з можливими помилками програмування, що призводять до порушення працездатності систем та програмного забезпечення. Спільне застосування дерева відмов та дерева ймовірностей дозволяє генерувати послідовності сценаріїв настання негативної події, спричиненої потенційно можливими дефектами або помилками в програмах та даних, та оцінювати ймовірності їх реалізації. Такий підхід дозволяє виявляти спільний результат впливу окремих ризикоутворюючих факторів (дефектів) на розвиток можливих негативних наслідків (відмов та збоїв) або збиток при функціонуванні складних програмних систем. Це дає можливість завчасно розпізнавати та запропонувати ефективні механізми управління програмними ризиками з метою їх скорочення та ліквідації.*

*Запропонована процедура агрегування індивідуальних ймовірнісних оцінок експертів реалізації сценарію настання ризикової події. Такий підхід дозволяє отримувати групові експертні оцінки можливості настання ризикової події на основі сформованої системи випадкових подій в узагальнену експертну оцінку. Отримані таким чином ймовірності реалізації ризикової події застосовуються при побудові дерева ймовірностей та розрахунку співвідношень ймовірнісного виведення на ньому. Агрегування індивідуальних експертних оцінок здійснюється шляхом їх комбінування на основі математичного апарату теорії свідоцтв та теорії правдоподібних і парадоксальних міркувань. Встановлено, що для підвищення якості результатів комбінування доцільно визначати порядок комбінування експертних свідоцтв та використовувати одне з правил перерозподілу конфліктів в якості правила комбінування.*

*Наведені чисельні розрахунки запропонованої методики комплексного застосування дерева відмов та дерева ймовірностей. Одержані результати дозволяють проводити більш глибокий аналіз програмних систем та об'єктів, що досліджуються, та покликані сприяти підвищенню якості та ефективності управління ризиками програмних проєктів, викликаними дефектами в програмах та даних*

*Ключові слова: дерево відмов, дерево ймовірностей, ризики програмних проєктів, аналіз сценаріїв, правила комбінування*

## 1. Вступ

Розвиток сценарного прогнозування призвів до розробки двох основних інструментальних методів: дерева цілей і прогнозного графу. Ці методи призначені для аналізу складних систем або процесів, в яких можливе виділення багатьох структурних або ієрархічних рівнів. Дерево цілей будується на основі формування головної цілі та різноманітних підцілей, що знаходяться на менш значимих рівнях ієрархії.

В основі методики побудови прогнозного графа покладено початкове здійснення підцілей і подій, що лежать на нижчих рівнях ієрархії з кінцевим виходом на головну ціль. Іншими словами, дерево цілей будується за принципом «зверху-вниз», а прогнозний граф – «знизу-вверх».

При розширенні спектру задач, що використовують для свого вирішення сценарне прогнозування, виник цілий ряд модифікацій графів типу «дерево». Наприклад, для вирішення задач аналізу надійності різних систем з'явилися дерево відмов та дерево подій. В якості засобів прийняття рішень використовуються дерева рішень, задачі ймовірнісного виведення можуть вирішуватись за допомогою дерев ймовірностей та ін. Разом з тим слід відмітити, що кожне з перерахованих дерев реалізує принцип «причина-наслідок» в межах конкретної задачі.

Аналіз методів сценарного прогнозування, представлених графами типу «дерево», показав, що вищезазначений принцип не враховується при виконанні декількох взаємопов'язаних задач сценарного прогнозування. Разом з тим, існує метод «краватка-метелик» (*bow-tie*), в основу якого покладені методи дерева відмов та дерева наслідків, який дозволяє простим графічним шляхом досліджувати причини виникнення ризикових подій та проводити аналіз їх можливих наслідків. Цей метод дозволяє встановлювати зв'язок між причинами і наслідками небезпечних (ризикових) подій задля розробки комплексу заходів спрямованих на запобігання і/або зменшення їх наслідків. Проте цей метод здійснює аналіз складних ситуацій в досить спрощеному вигляді і не дозволяє адекватно оцінити ймовірність настання комбінації чинників, що призводять до негативних наслідків, особливо за умови їх залежності. Він також не дозволяє відображати сукупність причин, що виникають одночасно і викликають негативні наслідки (аварійні ситуації).

Рішення зазначеної проблеми лежить в сфері комплексного застосування існуючих методів і засобів сценарного прогнозування, спрямованих на встановлення причин виникнення ризикоутворюючих факторів та прогнозування можливих сценаріїв розвитку їх наслідків. В цьому контексті актуальним є спільне застосування методів, спрямованих на виявлення причин негативних подій і методів ймовірнісного виведення. Які в свою чергу дозволяють моделювати складні невизначені ситуації (наслідки негативних подій), генерувати і оцінювати можливі сценарії їх розвитку.

Наприклад, при реалізації проектів з розробки програмного забезпечення (ПЗ), особлива увага приділяється процесу управління ризиками. Для ефективного управління програмними ризиками необхідно вміти ідентифікувати, аналізувати та прогнозувати їх можливі наслідки на кожному етапі процесу розробки програмного забезпечення у відповідності до обраної методології розробки ПЗ.

Для прогнозування ризиків, пов'язаних із можливими помилками програмування, що призводять до відмови ПЗ, широкого застосування набули формальні методи аналізу ризику відмов. Серед яких найбільш поширеними є метод дерева подій (*Event Tree Analysis, ETA*), дерева відмов (*Fault Tree Analysis, FTA*) та режимів і наслідків відмов (*Failure Modes and Effects Analysis, FMEA*). Зокрема при застосуванні методу FTA, помилки програмування розцінюються як причини, а відмова ПЗ, як наслідок. В той самий час відмова ПЗ може бути причиною виникнення низки наслідків негативного характеру (ризиків програмних проектів), наприклад, додаткові витрати на доробку ПЗ, порушення строків його поставки замовнику та ін. Аналіз таких наслідків може бути виконаний із використанням дерева ймовірностей.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

В роботах [1–4] розглянуті основні принципи побудови сценаріїв та методи їх аналізу. В роботі [1] визначені шляхи застосування сценарного підходу для аналізу складних соціальних систем, запропоновані загальні рекомендації щодо організації та проведення сценарних досліджень. Роботи [2, 3] націлені на аналіз сучасних методів та технік сценарного планування та прогнозування. В роботі [4] наведена класифікація методів та методик системного аналізу, особлива увага приділена методам типу «дерева цілей», методам експертних оцінок, структуризації та статистичного аналізу тощо. Досліджені методи та методики системного аналізу, які набули широкого застосування при проведенні аналізу та управління якістю підприємства. В роботі [5] описаний метод побудови «сценаріїв майбутнього» в стратегічному управлінні підприємствами. В роботах [1–5] залишились невирішені питання, пов'язані із вибором методів прогнозування та аналізу розглянутих сценаріїв.

Варіантом вирішення вказаної проблеми може бути застосування техніки ймовірнісного виведення на основі сценаріїв, побудованих із застосуванням дерев ймовірностей. Саме такий підхід був використаний в роботі [6] на прикладі розв'язання задачі аналізу ризикоутворюючих факторів організаційних та організаційно-технічних задач судноремонту в умовах невизначеності та ризику. Але автори не приділили уваги аналізу причин виникнення ризикоутворюючих факторів, які впливають на хід судноремонтного процесу, що в свою чергу є основою аналізу, оцінки та визначення напрямків зниження ризиків.

В якості підходу, який дозволяє аналізувати причину виникнення ризикоутворюючого фактору може бути застосовано метод дерева відмов.

В роботі [7] розглянуті загальні питання застосування методу дерева відмов для розв'язку широкого спектру задач в різних галузях та сучасні його модифікації, спрямовані на подолання існуючих недоліків методу.

Метод дерева відмов набув широкого застосування для аналізу ризиків техногенного походження. В роботі [8] запропонована методологія оцінки надійності, безпеки та техногенного ризику на основі логіко-графічних методів аналізу. Значна увага приділена методу дерева відмов, зокрема розглянуті методи якісної та кількісної оцінки дерева відмов, методика аналізу дерева відмов з подіями, що повторюються. Робота [9] присвячена особливостям застосування методу дерева відмов для оцінки техногенного ризику підприємств.

В роботі [10] запропоновано підхід, заснований на побудові та аналізі дерева відмов, що дозволяє проводити комп'ютерне та математичне моделювання ризику технологічного процесу. Такий підхід дозволяє визначити слабкі місця системи (досліджуваного об'єкту), визначати найбільш вірогідні події і параметри системи, що призводять до негативних подій.

На сьогоднішній день дерево відмов є ефективним інструментом для аналізу ризиків відмов ПЗ, який дозволяє проводити аналіз причин відмов (апаратних, програмних) та їх наслідків. В роботі [11] запропоновано метод якісного аналізу ризиків розробки ПЗ на основі комплексного використання методу дерева відмов і методики оцінки показника чистої приведеної вартості проекту розробки ПЗ. Автор роботи [12] застосовує метод дерева відмов для аналізу видів і наслідків відмов варіантів структур систем обробки інформації на прикладі аналізу дубльованих структур з версійно-часовою надмірністю.

В роботах [7–12] відзначається зворотна тенденція: проводиться аналіз причин виникнення ризикових ситуацій, але залишається не вирішеною задача аналізу і прогнозування можливих шляхів (сценаріїв) подолання або зниження ризиків.

В працях [5–12] методи сценарного аналізу і прогнозування розглядаються автономно, без врахування їх спільного застосування для випадків наявності взаємозв'язку задач, що вирішуються. Лише в роботі [13] досліджена можливість комплексного застосування формальних методів специфікації вимог і аналізу надійності. Розглядалися метод аналізу видів та наслідків критичних відмов та метод аналізу дерев відмов, на прикладі комп'ютерної системи управління рухом автотранспорту. Але залишились невирішені питання, пов'язані із оцінюванням ймовірності виникнення аварійних ситуацій, у випадку відсутності накопичених статистичних даних про події (аварійні ситуації) при застосуванні методу дерева відмов. Та визначення ймовірності найбільш критичних відмов при побудові матриці критичності за методом аналізу видів та наслідків критичних відмов.

В той же час, в роботі [14] застосовано метод «краватка-метелик», який дозволяє аналізувати можливі причини та наслідки реалізації ризиків. Зокрема в роботі [15] запропонована модифікація методу «краватка-метелик» та запропонована методика частково кількісної оцінки ризиків, яка була застосована

та випробувана в суднобудівній промисловості. Проте вказана техніка не дозволяє оцінювати ймовірність реалізації та можливі комбінації ризикоутворюючих факторів, що призводять до негативних наслідків.

Отже, все вищезазначене дозволяє стверджувати про доцільність проведення дослідження, присвяченого пошуку підходів, які дозволяють своєчасно виявляти і аналізувати ризикоутворюючі фактори, що призводять до можливих негативних наслідків. І в той самий час надають математичний апарат, який дозволяє моделювати і оцінювати вплив несприятливих подій (ризиків), прогнозувати можливі сценарії розвитку ризикових подій і проводити дослідження їх можливих наслідків.

### **3. Ціль та задачі дослідження**

Метою роботи є розроблення методики комплексного застосування формальних методів сценарного прогнозування, представлених графовими моделями ієрархічної структури, на прикладі спільного застосування дерева відмов та дерева ймовірностей.

Для досягнення мети дослідження було поставлено такі завдання:

- розробити процедуру агрегування індивідуальних експертних оцінок можливості прояву негативної (ризикової) події при розв'язанні задач ймовірнісного виводу на основі сценаріїв, побудованих із застосуванням дерев ймовірностей;
- дослідити можливість комплексного застосування дерева відмов та дерева ймовірностей наприкладі генерації послідовності сценаріїв настання ризикових подій, спричинених відмовами програмного забезпечення та аналізу їх наслідків;
- провести обчислювальний експеримент та аналіз отриманих результатів.

### **4. Матеріали і методи дослідження проблеми комплексного застосування методів сценарного прогнозування**

Дерево відмов являє собою дедуктивний логіко-графічний метод, що слугує для визначення можливих шляхів, що призводять до небажаної події (наприклад, до відмови системи або її окремих блоків). Ключовою теоретичною основою ФТА є припущення про те, що компоненти в системі працюють успішно або відмовляють повністю [16, 17].

Для графічного зображення найпростішого дерева відмов використовують базовий набір символічних зображень (рис. 1).

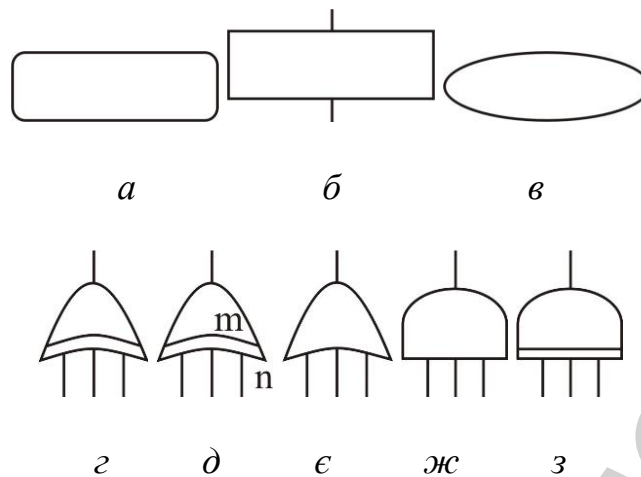


Рис. 1. Базовий набір символів FTA: *a* – вихідна подія; *б* – проміжна подія; *в* – результуюча подія; *г* – умова «та»; *д* – умова «або»; *е* – пріоритетне «та»; *ж* – виключне «або»; *з* – умова мажоритарності («m» з «n»)

Приклад простого дерева відмов представлений на рис. 2.

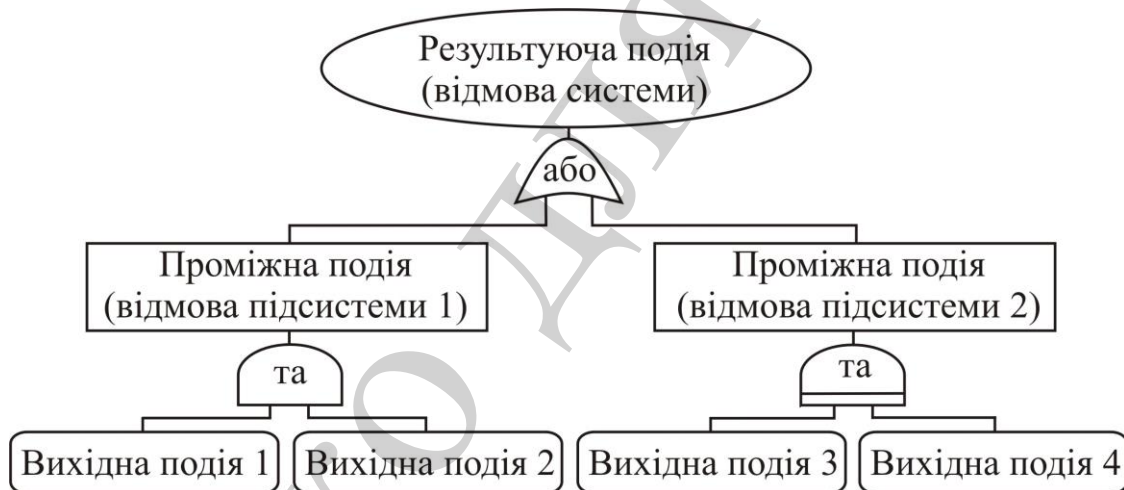


Рис. 2. Дерево відмов

Дерево ймовірностей (*Probability Tree Analysis, PTA*) застосовується для аналізу послідовності сценаріїв (варіантів) подальшого розвитку подій, котрі можуть бути наслідками прояву можливих відмов системи із застосуванням дерева відмов [18–20]. З цією метою формується набір систем випадкових подій та ймовірностей їх здійснення.

Кожна гілка дерева відображає одновипадкову подію з кожної системи випадкових подій (в даному випадку система випадкових подій складається із двох подій) та ймовірність (*P*) їх здійснення. Комбінації таких дерев, отримані їх

об'єднанням, призводять до дерева ймовірностей (рис. 3), що представляє собою деревовидний граф.

Кожен вузол (вершина) такого графа пов'язаний з однією повною системою випадкових подій. Кожна подія і ймовірність її реалізації відображається гілкою дерева, що виходить із відповідного вузла. Кожен шлях на дереві від кореневого вузла до кінцевої позиції відображає одну з можливих комбінацій подій, що називається сценарієм.

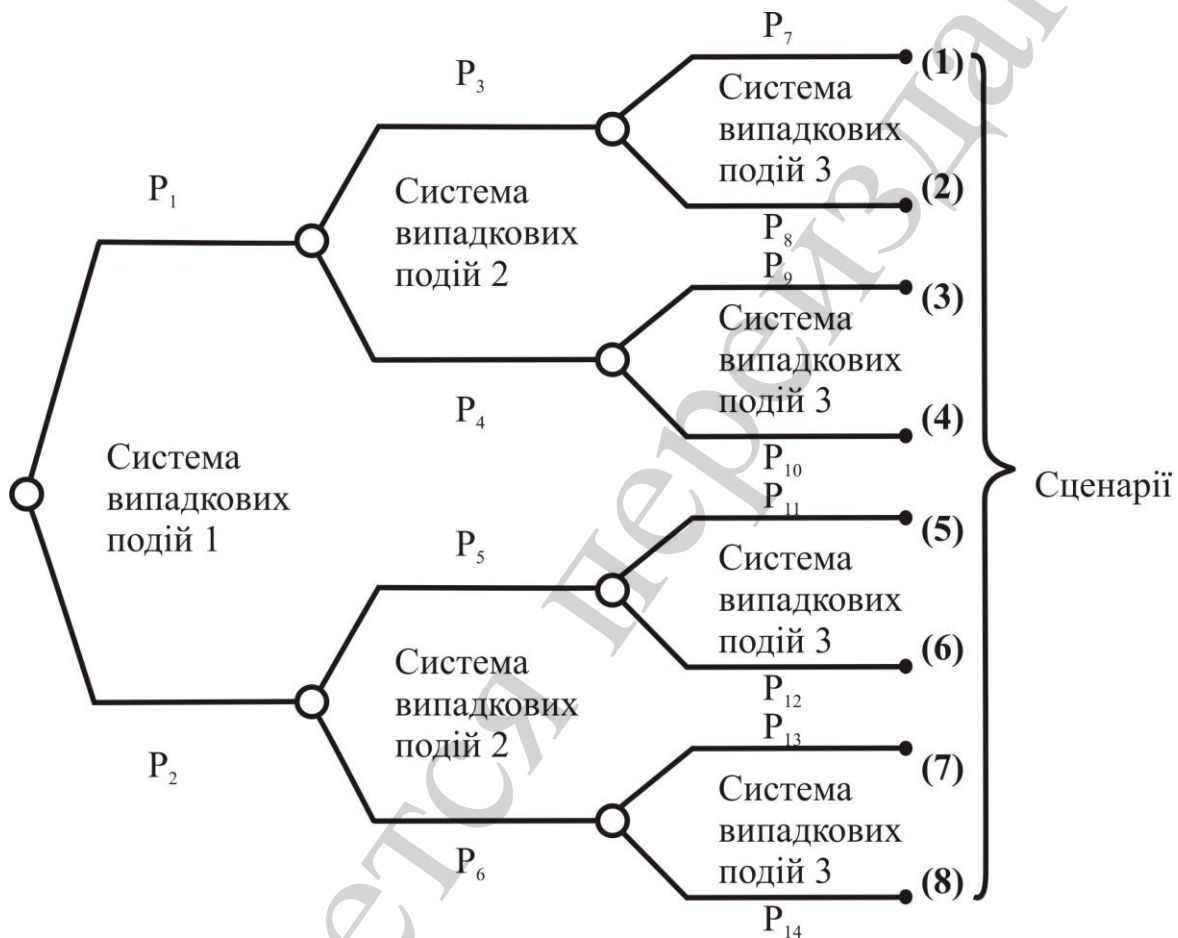


Рис. 3. Дерево ймовірностей

Загальна кількість сценаріїв може бути підрахована ще до побудови дерева ймовірностей як

$$N = \prod_{i=1}^z n_i, \quad (1)$$

де  $n_i$  — число подій в  $i$ -й системі випадкових подій;  $z$  — загальна кількість таких систем.

## 5. Процедура визначення агрегованих експертних оцінок реалізації ризикової події при розв'язанні задач ймовірнісного виведення

Дерево ймовірностей може бути використано як ефективний графічний інструмент для аналізу ризиків програмних проектів. Виділяють два основні підходи до отримання ймовірності настання ризикової події: об'єктивний та суб'єктивний. Об'єктивний метод визначення ймовірності настання негативної (ризикової) події проводиться на основі накопичених статистичних даних, в його основі лежить обчислення частоти, з якою відбуваються ризикові події. У разі відсутності достатньої кількості статистичної інформації для визначення ймовірності появи ризику використовують суб'єктивний метод, в основі якого лежать методи експертного оцінювання. В даному випадку оцінюється можливість настання несприятливої ситуації (ризiku) виходячи із міркувань, особистого досвіду фахівця (експерта).

Для отримання більш точної оцінки можливості настання ризикової події можна залучити декілька експертів (групу експертів). В цьому випадку виникає задача отримання агрегованих експертних оцінок.

Розглянемо процедуру агрегування індивідуальних ймовірнісних оцінок експертів при вирішенні задач ймовірнісного виведення на деревах ймовірностей.

Припустимо, задана множина експертів  $E = \{E_i | i = \overline{1, l}\}$ , та множина ризикових подій  $R = \{r_j | j = \overline{1, k}\}$ . Будемо вважати, що  $R$  являє собою множину незалежних подій. Кожному експерту пропонується оцінити можливість (ймовірність) настання ризикової події  $r_j \in R$  за шкалою від 0 до 1. Або, виходячи із своїх знань та досвіду, експерти можуть представити свої оцінки реалізації ризикової події в рамках заданої шкали експертних вимірювань.

Результати експертного опитування у вигляді сукупності індивідуальних експертних оцінок можна представити у формі матриці розмірністю  $l \times k$  виду:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ik} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{l1} & a_{l2} & \dots & a_{lk} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $a_{ij}$  – можливість (ймовірність) настання ризикової події  $r_j$ , яка сформована  $i$ -м експертом.



В результаті буде отримана множина  $B = \{b_i \mid i = \overline{1, l}\}$ , кожний елемент якої являє собою вектор оцінок експерта  $E_i$ :  $b_i = \{p_j \mid j = \overline{1, k}\}$ , де  $p_j$  – можливість (ймовірність) настання ризику  $r_j$ .

Таким чином, для кожного експерта може бути побудовано  $k$ -систем випадкових подій, які графічно можна представити у вигляді дерева розподілів, кожна гілка якого відображає ймовірність настання аналізованої ризикової події.

Припустимо задана основа аналізу  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2\}$ , де  $\omega_1$  – ризик  $r_j$  реалізується;  $\omega_2$  – ризик  $r_j$  розглядається як несуттєвий (відсутній). Якщо  $m(\omega_1)$  ймовірність настання ризику  $r_j$ , то ймовірність його відсутності може бути виражена як  $m(\omega_2) = 1 - m(\omega_1)$ .

Таким чином для кожного ризику  $r_j$  буде отримано вектор  $M_j = \{m_i^{(j)} \mid i = \overline{1, l}\}$ , де  $m_i^{(j)} = \{m(\omega_1), m(\omega_2)\}$  – вектор ймовірнісних оцінок події  $r_j$ , сформований на основі індивідуальних оцінок експерта  $E_i$ .

Для отримання агрегованих оцінок, скористаємося математичним апаратом теорії свідочств [21–23].

Агрегування індивідуальних експертних переваг здійснюється шляхом комбінування отриманих основних мас ймовірностей для кожної ризикової події  $r_j$  за всіма експертами  $m_{rez}^{(j)} = m_1^{(j)} \oplus m_i^{(j)} \oplus \dots \oplus m_l^{(j)}$ . Для агрегування експертних оцінок рекомендовано використовувати одне з правил перерозподілу конфліктів [22, 23].

В результаті для кожного заданого ризику  $r_j$  буде отримано вектор ймовірнісних оцінок його реалізації  $m_{rez}^{(j)} = \{m(\omega_1), m(\omega_2)\}$ .

Далі проводиться аналіз та розрахунок отриманого дерева ймовірностей для незалежних систем випадкових подій, з відповідними ймовірнісними оцінками настання  $m_{rez}^{(j)}(\omega_1) \in m_{rez}^{(j)}$  та ненастання (відсутності)  $m_{rez}^{(j)}(\omega_2) \in m_{rez}^{(j)}$  негативної події  $r_j$ .

З метою підвищення якості результатів комбінування при побудові агрегованих оцінок, пропонується визначати порядок комбінування експертних свідочств, наприклад, враховуючи міру відмінності і структуру експертних свідочств [24–26].

## **6. Методика комплексного застосування методів сценарного прогнозування**

Розглянемо приклад комплексного застосування дерева відмов і дерева ймовірностей в сценарному прогнозуванні можливих відмов програмного забезпечення та їх наслідків.

Припустимо, що кількість систем випадкових подій  $z=3$ , а кількість подій в кожній із систем  $n=2$ . Тоді кількість отриманих сценаріїв дорівнює:

$$N = \prod_{i=1}^3 2 = 2 * 2 * 2 = 8.$$

Наведемо схеми формування всіх сценаріїв:

$$(1): P_1 \rightarrow P_3 \rightarrow P_7;$$

$$(2): P_1 \rightarrow P_3 \rightarrow P_8;$$

$$(3): P_1 \rightarrow P_4 \rightarrow P_9;$$

$$(4): P_1 \rightarrow P_4 \rightarrow P_{10};$$

$$(5): P_2 \rightarrow P_5 \rightarrow P_{11};$$

$$(6): P_2 \rightarrow P_5 \rightarrow P_{12};$$

$$(7): P_2 \rightarrow P_6 \rightarrow P_{13};$$

$$(8): P_2 \rightarrow P_6 \rightarrow P_{14}.$$

Розглянемо три типові проектні ризики  $R = \{r_j \mid j = \overline{1, k}\}$ ,  $k=3$ :  $r_1$  – додаткові витрати на доопрацювання ПЗ (ризик перевищення вартості проекту);  $r_2$  – порушення строків поставки ПЗ замовнику (ризик перевищення строків виконання робіт);  $r_3$  – плінність кадрів (ризик кадрового забезпечення).

Групі експертів у кількості 5 чоловік  $E = \{E_i \mid i = \overline{1, l}\}$ ,  $l=5$  запропоновано оцінити можливість (ймовірність) настання кожного ризику в рамках заданої шкали оцінок. Експерти висловлювали свої судження за шкалою від 0 до 1: ризик відсутній (0); ризик несуттєвий – незначна ймовірність реалізації ризикової події (0.1); низька ймовірність реалізації ризикової події (0.3); про можливість реалізації ризикової події нічого певного сказати не можна (0.5); висока ймовірність реалізації ризикової події (0.7); критична ймовірність реалізації ризикової події (0.9); однозначно, що ризикова ситуація настане (1). Значення 0.2; 0.4; 0.6; 0.8 – відповідають проміжним судженням між кожною градацією. Результати експертного опитування наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Оцінки експертів ризикових подій

$r_i$	$m(\omega_i)$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$m_{12345}$
$r_1$	$m(\omega_1)$	0.4	0.3	0.5	0.2	0.6	0.34
	$m(\omega_2)$	0.6	0.7	0.5	0.8	0.4	0.66
$r_2$	$m(\omega_1)$	0.2	0.4	0.7	0.3	0.4	0.29
	$m(\omega_2)$	0.8	0.6	0.3	0.7	0.6	0.71
$r_3$	$m(\omega_1)$	0.7	0.5	0.4	0.6	0.8	0.78
	$m(\omega_2)$	0.3	0.5	0.6	0.4	0.2	0.22

Для отримання агрегованої (колективної) оцінки було використано правило комбінування PCR5 [22]. Комбінована маса ймовірності  $m_{PCR5}(C)$  відповідно до правила перерозподілу конфліктів PCR5 розраховується на основі виразу:

$$m_{PCR5}(C) = m_{12}(C) + \sum_{\substack{Y \in D^A \setminus \{X\} \\ X \cap Y = \emptyset}} \left[ \frac{m_1(X)^2 \cdot m_2(Y)}{m_1(X) + m_2(Y)} + \frac{m_2(X)^2 \cdot m_1(Y)}{m_2(X) + m_1(Y)} \right], \quad (2)$$

де  $m_{12}(C)$  – комбінована маса ймовірності для підмножини  $C = X \cap Y$ , що розраховується на основі кон'юнктивного консенсусу.

На рис. 4 наведені дерева розподілів, побудовані на основі агрегованих експертних оцінок, кожне з яких відображає ймовірність настання негативної події (ризик)  $r_j \in R$ , яка може вплинути на реалізацію проекту.



Рис. 4. Деревя розподілів систем випадкових ризикових подій

На успішну реалізацію проекту можуть вплинути не тільки окремі ризики, а й їх можливі комбінації.

На рис. 5 представлено комплексне застосування дерева відмов та дерева ймовірностей для сценарного прогнозування можливих відмов ПЗ і наступних за ними подій, що можуть привести до негативних наслідків.

На дереві відмов прийняті наступні позначення [27]: 1 – помилки в специфікації; 2 – помилки в вихідних даних; 3 – відхилення від специфікації; 4 –

помилкова логіка або послідовність операцій; 5 – нестача часу для переривань; 6 – нестача часу для рішень; 7 – помилкові арифметичні операції; 8 – неточний запис; 9 – спотворення правил програмування.

Логічні операції «та» формують відповідно:

$та_1 \ 1 \wedge 2 \wedge 3 \rightarrow 10$  – помилки при постановці задач;

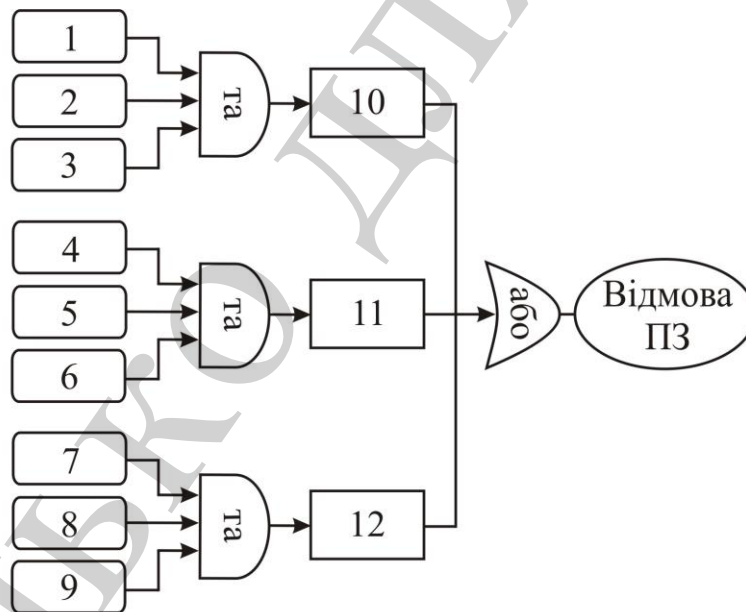
$та_2 \ 4 \wedge 5 \wedge 6 \rightarrow 11$  – помилки алгоритмізації;

$та_3 \ 7 \wedge 8 \wedge 9 \rightarrow 12$  – помилки програмування.

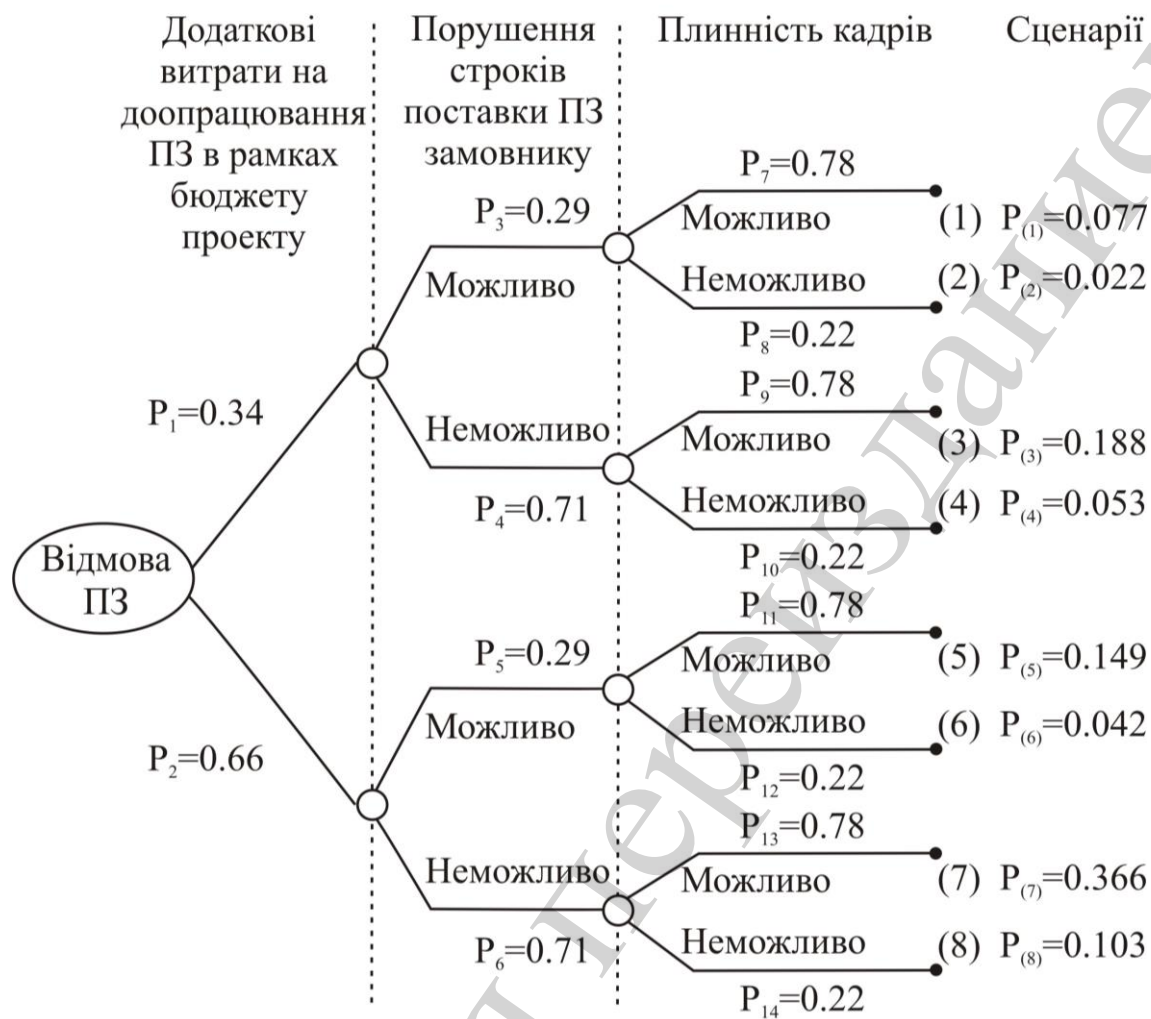
Логічна операція «або»:  $(1 \wedge 2 \wedge 3) \vee (4 \wedge 5 \wedge 6) \vee (7 \wedge 8 \wedge 9) = 10 \vee 11 \vee 12$  – може призвести до відмови ПЗ, що на дереві відмов розглядається як наслідок проявлення визначеної множини помилок програмування.

В той же час відмова ПЗ може розцінюватись як причина, котра може призвести до ряду подій, що відображено на дереві ймовірностей.

В розглянутому прикладі передбачається, що всі випадкові ризикові події є ймовірно незалежні (порядок проходження вузлів на дереві ймовірностей є довільним), рис 5.



*a*



б

Рис. 5. Комплексне застосування методів сценарного прогнозування: а – дерево відмов; б – дерево ймовірностей

Дерево ймовірностей для прикладу, що розглядається, дозволяє сформувати 8 сценаріїв з наступними ймовірностями їх реалізації:

$$P_{(1)}=P_1*P_3*P_7=0.34*0.29*0.78=0.077;$$

$$P_{(2)}=P_1*P_3*P_8=0.34*0.29*0.22=0.022;$$

$$P_{(3)}=P_1*P_4*P_9=0.34*0.71*0.78=0.188;$$

$$P_{(4)}=P_1*P_4*P_{10}=0.34*0.71*0.22=0.053;$$

$$P_{(5)}=P_2*P_5*P_{11}=0.66*0.29*0.78=0.149;$$

$$P_{(6)}=P_2*P_5*P_{12}=0.66*0.29*0.22=0.042;$$

$$P_{(7)}=P_2*P_6*P_{13}=0.66*0.71*0.78=0.366;$$

$$P_{(8)}=P_2*P_6*P_{14}=0.66*0.71*0.22=0.103.$$

$$P = \sum_{i=1}^8 P_{(i)} = 0.077 + 0.022 + 0.188 + 0.053 + \\ + 0.149 + 0.042 + 0.366 + 0.103 = 1.$$

Враховуючи отримані результати може бути обраний сценарій з найбільшим значенням ймовірності його настання (сценарій 7 з  $P_{(7)}=0.366$ ), тобто ймовірність реалізації сценарію 7 складає 36.6 %. Сценарій (2), за умови прийнятних показників ризикових подій, має мінімальну ймовірність його реалізації.

Перетворення дерева, за умови незалежності випадкових подій, викликає новий перерозподіл ймовірнісних оцінок між подіями. Це дає можливість проаналізувати і визначити ймовірність реалізації кожного із можливих сценаріїв, які формуються при різних комбінаціях систем випадкових ризикових подій.

У випадку існування залежності між ризиковими подіями необхідно визначити апіорні ймовірності їх реалізації та умовні ймовірності виникнення подій. Для оцінювання умовних ймовірностей на основі процедури експертного оцінювання, може бути застосована методика, яка запропонована в роботі [28].

## **7. Обговорення результатів дослідження проблеми комплексного застосування методів сценарного прогнозування**

На даний час створений цілий ряд інструментальних методів сценарного аналізу та прогнозування, які представлені різноманітними графами типу «дерево». Кожен з таких методів націлений на вирішення конкретної задачі прогнозування і не враховує можливої наявності декількох взаємопов'язаних задач, що визначають загальну проблему. Розглянутий в роботі підхід комплексного застосування методів сценарного прогнозування дозволяє проводити більш глибокий аналіз систем та об'єктів, що досліджуються.

Спільне застосування методу дерева відмов та дерева ймовірностей являє собою ефективний інструмент аналізу можливих сценаріїв подальшого розвитку подій, які є наслідками прояву відмов програмної системи. Такі відмови є причиною порушення роботоспроможності та безпеки реалізації основних функцій програмної системи. Побудовані таким чином сценарії дозволяють ідентифікувати можливі ризикові події, спричинені відмовами системи, які в реальних складних програмних системах можуть призвести до катастрофічних наслідків із значним збитком. Перевага запропонованої методики полягає у

можливості визначати ймовірність реалізації сценарію на основі групової експертної оцінки. Особливість даного підходу полягає в тому, що він дозволяє обробляти оцінки експертів, сформовані в умовах невизначеності (наприклад, експерт не може оцінити можливість настання ризику), а також суперечливі, неузгоджені експертні судження. Такі переваги досягаються за рахунок застосування механізму комбінування при агрегуванні індивідуальних експертних оцінок на основі математичного апарату теорії свідочств та теорії правдоподібних і парадоксальних міркувань.

Як недолік слід зазначити обмеження, що накладаються на кількість систем випадкових подій, які аналізуються при побудові дерева ймовірностей. Спостерігається експоненційне зростання його розміру та, як наслідок, кількості можливих сценаріїв, із збільшенням кількості аналізованих систем випадкових подій, особливо за умови значної кількості подій у таких системах. Доцільно використовувати дерево ймовірностей за умови, що кількість систем випадкових подій не перевищує 4.

Запропонований підхід може бути використаний як доповнення до існуючих методів аналізу ризиків програмних проектів, основною причиною яких є дефекти в апаратному та програмному забезпеченні, даних або обчислювальних процесах.

Так, наприклад, в процесі проведення якісного аналізу ризиків оцінюється можливість реалізації несприятливої події (ризик) та її вплив на проект. В результаті формується список ризиків ранжованих за ступенем їх впливу на проект та карта ризиків. Ранжування ризиків може бути здійснено на основі аналізу матриці «ймовірність/наслідок», відповідно до стандарту PMBOK. У випадку, коли можливість реалізації ризику визначається на основі суб'єктивних ймовірностей групою спеціалістів відповідного профілю, колективна оцінка може бути сформована на основі запропонованої процедури агрегування індивідуальних ймовірнісних оцінок експертів.

Іншим прикладом є спільне використання запропонованої методики генерації послідовності сценаріїв настання негативної події та аналіз чутливості окремих ризикоутворюючих факторів до відхилень параметрів системи. Такий підхід дозволяє визначати ризикоутворюючі фактори, які мають найбільший вплив на реалізацію проекту.

Запропонована методика може бути застосована в умовах використання сучасних гнучких методів розробки програмного забезпечення. Розвиток технологій управління програмними проектами призвів до появи гнучких та адаптивних методологій розробки ПЗ. Більшість з них націлена на мінімізацію ризиків, шляхом зведення розробки до визначеної кількості коротких циклів-ітерацій, кожен з яких має завершуватися генерацією чергової проміжної версії ПЗ. Звертаючись до класу ітеративних моделей розробки ПЗ, можна зазначити, що запропонований підхід може бути застосований на етапі тестування поточного прототипу ПЗ. Що дозволить проводити аналіз впливу ризиків можливих відмов (виявлення їх причин та наслідків) на стан процесу розробки ПЗ.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку методів підвищення якості отриманої експертної інформації та дослідження можливості використання мереж Байєса для аналізу послідовності сценаріїв варіантів розвитку негативної події.

## **8. Висновки**

1. Для агрегування індивідуальних експертних оцінок можливості настання ризикової події в роботі запропоновано використовувати механізм комбінування на основі одного з правил теорії свідоцтв або теорії правдоподібних та парадоксальних міркувань. Визначено, що при використанні правил перерозподілу конфліктів отримуються більш ефективні результати комбінування. Встановлення порядку комбінування експертних свідоцтв дозволило підвищити якість та точність результатів комбінування. Такий підхід дозволяє не ігнорувати та не втрачати експертну інформацію, отриману на основі не співпадаючих, суперечливих експертних свідоцтв.

2. Досліджена можливість комплексного застосування формальних методів сценарного прогнозування, а саме дерева відмов та дерева ймовірностей. Запропонована методика комплексного застосування дерева відмов та дерева ймовірностей дозволяє аналізувати послідовності сценаріїв прояву ризикової події, спричиненої випадковими негативними впливами можливих відмов функціонування технічної, програмної системи, або її окремих елементів. Це дає можливість завчасно ідентифікувати ризики та прогнозувати наслідки їх впливу на безаварійну експлуатацію системи, запропонувати дієві та своєчасні механізми їх управління, поліпшити контроль та моніторинг можливих загроз. Це, в свою чергу, дозволяє підвищити продуктивність та якість роботи технічних, програмних систем та знизити можливий фінансовий збиток, пов'язаний із реалізацією ризикової події.

3. Наведені приклади практичної реалізації запропонованої методики комплексного застосування дерева відмов та дерева ймовірностей на прикладі вирішення задачі аналізу ризиків програмних проектів, спричинених відмовами у функціонуванні програмного забезпечення та системи. Одержані практичні результати покликані своєчасно виявляти та аналізувати потенційно можливі дефекти в програмах та даних на етапі проектування, реалізації, або при порушенні технології виконання програмного проекту. Їх застосування дозволяє оперативно корегувати прогнози прояву ризикової події, пов'язаної із можливими відмовами програмного забезпечення. З метою застосування ефективних методів і засобів скорочення ризиків та мінімізації пов'язаних з ними наслідків їх негативного впливу на всіх етапах життєвого циклу програмних систем. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню надійності програмних систем за рахунок ідентифікації прихованих помилок та дефектів та аналізу можливих сценаріїв їх впливу на якість створюваного продукту.



## Література

1. Переверза К. В. Сценарний підхід у задачах аналізу складних соціальних систем // Системні дослідження та інформаційні технології. 2011. № 1. С. 133–143.
2. Amer M., Daim T. U., Jetter A. A review of scenario planning // Futures. 2013. Vol. 46. P. 23–40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2012.10.003>
3. Bishop P., Hines A., Collins T. The current state of scenario development: an overview of techniques // Foresight. 2007. Vol. 9, Issue 1. P. 5–25. doi: <https://doi.org/10.1108/14636680710727516>
4. Трофимова М. С., Трофимов С. М. Обзор методов и методик системного анализа применительно к управлению качеством предприятия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2015. № 14. С. 74–85.
5. Использование метода «сценариев будущего» в стратегическом управлении // Образовательный сайт Викторовой Т.С. URL: <http://www.viktorovats.ru/page299/page433/index.html>
6. Kovalenko I. I., Shved A. V., Melnik A. V. Probability analysis of risk-contributing factors in organizational tasks of ship repair // Shipbuilding & Marine Infrastructure. 2014. Vol. 2, Issue 2. P. 111–119.
7. Baig A. A., Ruzli R., Buang A. B. Reliability analysis using fault tree analysis: a review // International Journal of Chemical Engineering and Applications. 2013. Vol. 4, Issue 3. P. 169–173. doi: <https://doi.org/10.7763/ijcea.2013.v4.287>
8. Шубин Р. А. Надежность технических систем и техногенный риск. Тамбов: ФГБОУ ВПО ТГТУ, 2012. 80 с.
9. Никитенко Ю. В. Особенности применения метода построения деревьев отказов для оценки техногенного риска предприятий оборонно-промышленного комплекса // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21831>
10. Тоніца О. В., Єременко І. В. Комп'ютерне моделювання систем аналізу безпеки технологічних об'єктів // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ". Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2010. № 67. С. 45–50.
11. Коваленко О. В. Методи якісного аналізу та кількісної оцінки ризиків розробки програмного забезпечення // Системи управління, навігації та зв'язку. 2018. № 3 (49). С. 116–125. doi: <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.3.116>
12. Шурігін О. В. Методичні основи аналізу відмов в системах обробки інформації зразків озброєння та військової техніки // Системи озброєння і військова техніка. 2009. № 4. С. 178–181.
13. Пример комплексного использования формальных методов спецификации требований и анализа надежности компьютерных систем управления / Тарасюк О. М., Горбенко А. В., Харченко В. С., Мотора Ю. В. // Системи обробки інформації. 2010. № 8 (89). С. 83–89.

14. Targoutzidis A. Incorporating human factors into a simplified “bow-tie” approach for workplace risk assessment // *Safety Science*. 2010. Vol. 48, Issue 2. P. 145–156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.07.005>
15. Jacinto C., Silva C. A semi-quantitative assessment of occupational risks using bow-tie representation // *Safety Science*. 2010. Vol. 48, Issue 8. P. 973–979. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.08.008>
16. Ruijters E., Stoelinga M. Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools // *Computer Science Review*. 2015. Vol. 15-16. P. 29–62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.03.001>
17. Fault and Event Tree Analyses for Process Systems Risk Analysis: Uncertainty Handling Formulations / Ferdous R., Khan F., Sadiq R., Amyotte P., Veitch B. // *Risk Analysis*. 2011. Vol. 31, Issue 1. P. 86–107. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01475.x>
18. Светульников С. Г. Методы социально-экономического прогнозирования. Т. 1: учеб. СПб.: СПбГУЭФ, 2009. 147 с.
19. Uzga-Rebrov O. Modern concepts and applications of probability theory. Rezekne: RA Izdevnieciba, 2004. 292 p.
20. Коваленко И. И., Швед А. В. Методы экспертного оценивания сценариев: учеб. Николаев: ЧГУ им. Петра Могилы, 2012. 156 с.
21. Shved A. Probabilistic risk analysis of investment projects under uncertainty // 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/idaacs.2017.8095072>
22. Smarandache F., Dezert J., Tacnet J. Fusion of sources of evidence with different importances and reliabilities // 2010 13th International Conference on Information Fusion. 2010. doi: <https://doi.org/10.1109/icif.2010.5712071>
23. Uzga-Rebrovs O. I. Nenoteiktību parvaldisana. Part 3. Rezekne: RA Izdevnieciba, 2010. 560 p.
24. Kovalenko I., Shved A. Development of a technology of structuring group expert judgments under various types of uncertainty // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3, Issue 4 (93). P. 60–68. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133299>
25. Shved A., Davydenko Y. The analysis of uncertainty measures with various types of evidence // 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP). 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/dsmp.2016.7583508>
26. Jousselme A.-L., Maupin P. Distances in evidence theory: Comprehensive survey and generalizations // *International Journal of Approximate Reasoning*. 2012. Vol. 53, Issue 2. P. 118–145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2011.07.006>
27. Павловская О. О. Статические методы оценки надежности программного обеспечения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2009. № 10. С. 35–37.

28. Орлов А. И., Савинов Ю. Г., Богданов А. Ю. Опыт экспертного оценивания условных вероятностей редких событий при разработке автоматизированной системы прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 4 (2). С. 501–506.